

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Hodnocení vybraných vlastností svarového spoje
nizkouglikové oceli zpracované vícenásobnou plastickou
deformací

Evaluation of Selected Welded Joints Properties Low
Carbon Steel Processed by Severe Plastic Deformation

Student:	Pavel Boxan
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2013

Zadání bakalářské práce

Student: **Pavel Boxan**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Téma: **Hodnocení vybraných vlastností svarového spoje nízkouhlíkové oceli
zpracované vícenásobnou plastickou deformací
Evaluation of Selected Welded Joints Properties Low Carbon Steel
Processed by Severe Plastic Deformation**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte studii technologie výroby materiálů s velmi jemnou strukturou vícenásobnou plastickou deformací.
2. Proveďte studii technologii svařování vhodných pro velmi jemnozrnné materiály.
3. Navrhněte a realizujte experimentální program ověření vybraných vlastností svarového spoje nízkouhlíkové oceli.
4. Proveďte diskusi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:


ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.
MICHENKA, V., RUSZ, S., GOTTWALD, M., MALANIK, K., KEDRON, J. and TYLSAR, S.
Evaluation of DRECE forming process of Cu-based alloys and proposal of testing method for evaluation of UFG materials microstructural stability, In. *Transactions of the VSB – Technical University of Ostrava, Mechanical Series*, No. 2, 2010, vol. LVI, p.131-142.
RUSZ, S., MICHENKA, V., SALAJKA, M., TYLŠAR, S., KEDROŇ, J., JANČA, J. The Forming of Strip Sheet of Low Carbon Steel by DRECE Proceee (Dual Rolls Equal CHannel Extrusion. In. *Metall 2012*, Tanger Ltd.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013


prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry





doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě 20.5.2013


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše)
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 20.5.2013


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Pavel Boxan

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Hraniční 40/3; Janovice u Rýmařova 793 42

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BOXAN, P. *Hodnocení vybraných vlastností svarového spoje nízkouhlíkové oceli zpracované vícenásobnou plastickou deformací : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2013, 38 s. Vedoucí práce: Ochodek, V.

Bakalářská práce se zabývá vlivem svařování na svarový spoj nízkouhlíkové oceli zpracované vícenásobnou plastickou deformací. V úvodu je popsána metoda DRECE pro výrobu takto zpracované oceli a také zde jsou představeny vhodné metody svařování pro tento typ materiálu. Experimentální část se věnuje zkoumání vlivu svařování pomocí analýzy zbytkových napětí, zkoumání makrostruktury a mikrostruktury svaru a měření mikrotvrdosti. Závěr práce obsahuje vyhodnocení vlivu svařování založený na porovnání naměřených hodnot mikrotvrdosti, vyhodnocení analýzy zbytkového napětí a porovnání struktur vzniklých důsledkem svařování.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

BOXAN, P. *Evaluation of Selected Welded Joints Properties Low Carbon Steel Processed by Severe Plastic Deformation : Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2013, 38 p. Thesis head: Ochodek, V.

This bachelor thesis examines the influence of welding to weld low carbon steel processed multiple plastic deformation. The introduction describes a method DRECE for the production this treated steel and also techniques for suitable welding method for this type of material. Experimental section is devoted to examining the influence of welding residual stresses by analysis, examining the weld macrostructure and microstructure and microhardness. The conclusion is the evaluation of the influence of welding based on a comparison of the measured values of microhardness, residual stress analysis, evaluation and comparison of the structures arising due to welding.

Obsah

	strana
Seznam použitých značek a symbolů	7
0 Úvod	8
1 Charakteristika zařízení DRECE	10
2 Rozbor technologií svařování, které jsou vhodné pro tento materiál	12
2.1 Mikroplazmové svařování.....	13
2.2 Elektronové svařování ve vakuu	14
2.3 Laserové svařování.....	15
2.4 TIG-v pulzním režimu.....	18
3 Experimentální část	20
3.1 Charakteristika oceli 1.1203.....	20
3.2 Úprava a svaření vzorků.....	20
3.3 Analýza zbytkových napětí	22
3.4 Makrostruktura a mikrostruktura svaru.....	25
3.5 Měření mikrotvrdosti	30
3.6 Diskuze dosažených výsledů.....	32
4 Závěr	34
5 Seznam použité literatury	37
6 Seznam příloh	38

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Jednotka	Význam
A_{80mm}	[%]	Tažnost
Ac_1	[°C]	Teplota eutektoidní přeměny
Ac_3	[°C]	Teplota přeměny austenitu na ferit
CONFORM	-	Continuous Extrusion Forming
DRECE	-	Dual Rolling Equal Channel Extrusion
ECAP	-	Equal Channel Angular pressing
HV	-	Tvrdost dle Vickerse
I_1	[A]	Horní svařovací proud
I_2	[A]	Dolní svařovací proud
NM	-	Nanomateriály
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu při protažení o 0,2%
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
TIG	-	Svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu
TOO	-	Tepelně ovlivněný materiál
U_1	[V]	Horní svařovací napětí
U_2	[V]	Dolní svařovací napětí
UFG	-	Ultrajemnozrné (ultra fine grained)
t_1	[s]	Délka doby svařování proudem I_1
t_2	[s]	Délka doby svařování proudem I_2

0 Úvod

Již na začátku druhé poloviny 20. století vědci začali chápat, že vlastnosti kovů nejsou charakterizovány pouze chemickým složením, ale i vnitřní strukturou, potažmo velikostí a tvarem zrn. Během této doby proběhly v laboratorních podmínkách pokusy vedoucí ke zmenšení velikosti zrn kovů za účelem zvýšení mechanických vlastností. Teprve po několika desítkách let se tento proces začal uplatňovat v praxi a byly vyvinuty metody pro efektivní a produktivní výrobu zjemněných materiálů. V dnešní době klasifikujeme materiály podle velikosti zrna, následovně:

- materiály definované velkými oblastmi tzv. lící struktura (odlévané součásti)
- materiály se sníženou velikostí zrna (například po tváření)
- materiály definované velmi malou velikostí zrn, dělí se na NM (nanomateriály) a UFG (ultrajemnozrné) materiály

Pro výrobu ultrajemnozrných materiálů a nanomateriálů slouží široká škála metod založených na postupném zmenšování velikostí zrn hrubozrnných materiálů. Využívá se přitom různých specializovaných tvářecích procesů využívajících akumulaci vysokých hodnot deformace. Tyto procesy se obecně označují zkratkou SPD metody.

Při úpravě materiálu metodami SPD jsou rozhodující dva faktory. Jedním je maximální teplota materiálu vzniklá plastickou deformací a druhým je smykové napětí. „Právě smykové napětí je také faktorem, který ovlivňuje uzavírání pórů a dutin, čímž zvyšuje hustotu takto připravených materiálů.“ [1] Cílem vícenásobné plastické deformace je zlepšení pevnostních a únavových vlastností, tvrdosti, odolnosti proti opotřebení, korozní odolnosti a případně dalších pozitivně se projevujících změn vlastností. Nepříznivou vlastností, která se projevuje při vícenásobné plastické deformaci, je klesání plastických vlastností. To je zapříčiněno zmenšením poměru hodnot pevnosti R_m k mezi kluzu R_e . Z tohoto důvodu se materiály upravené metodami SPD nehodí k technologickému zpracování pomocí tvářecích procesů, jako je lisování nebo tažení plechu.

Tato práce se zabývá materiálem 1.1203 dle ČSN EN 10 027-2 (12 060 dle ČSN 42 002) upraveným procesem vícenásobné plastické deformace v zařízení DRECE s šesti násobným průchodem tímto zařízením. Jelikož výstupní materiál z tohoto zařízení je

relativně malý a pro většinu aplikací v praxi těžko použitelný, je zapotřebí zvolit technologii spojení, která zaručí v co nejmenší míře degradaci získaných vlastností s dostatečnou produktivitou.

K tomu poslouží vybrané druhy svařování, a to svařování laserem, elektronovým paprskem, plazmou případně i TIG v pulzním režimu, které jsou popsány v následujících kapitolách.

Experimentální část bakalářské práce obsahuje zhodnocení vlivu svařování metodou analýzy zbytkových napětí před svařováním a po svařování vzorků v základním stavu a upraveném stavu v zařízení DRECE, zhodnocení struktur na metalografickém výbrusu, měření mikrotvrdosti a vyhodnocení důsledků svařování metodou TIG v pulzním režimu na materiál.

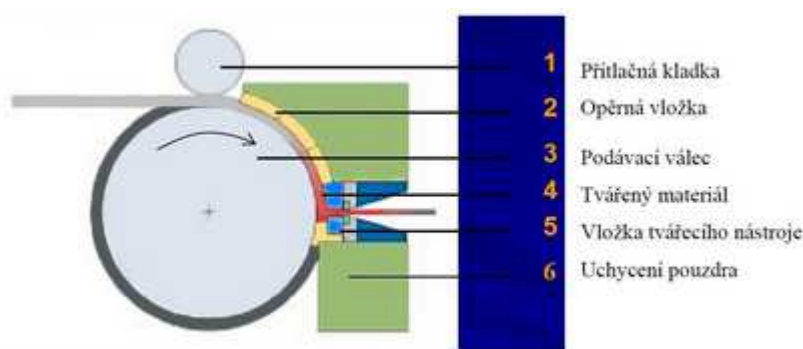
1 Charakteristika zařízení DRECE

Zařízení DRECE bylo vyvinuto ze zařízení CONFORM, které kombinuje proces válcování s technologií ECAP a slouží ke zjemnění struktury kovových materiálů za pomoci vícenásobné plastické deformace. Toto zařízení bylo zprovozněno na katedře mechanické technologie v prostorách VŠB – TU Ostrava v roce 2008. Cílem tohoto zjemňování je zlepšení mechanických vlastností a to především meze kluzu, v menší míře meze pevnosti a tvrdosti. Takto zjemněné materiály patří do skupiny materiálů UFG, které charakterizuje velikost zrn v rozmezí od 100 do 1000 nm. Na katedře mechanické technologie bylo již provedeno hodně experimentů na slitinových materiálech Al-Cu, Al-Cu-Mg či Al-Cu-Zn. Tato práce se však zaměřuje na nízkouhlíkovou ocel 1.1203.



Obrázek 1 – Zařízení DRECE v prostorách VŠB [5]

Popis zařízení CONFORM

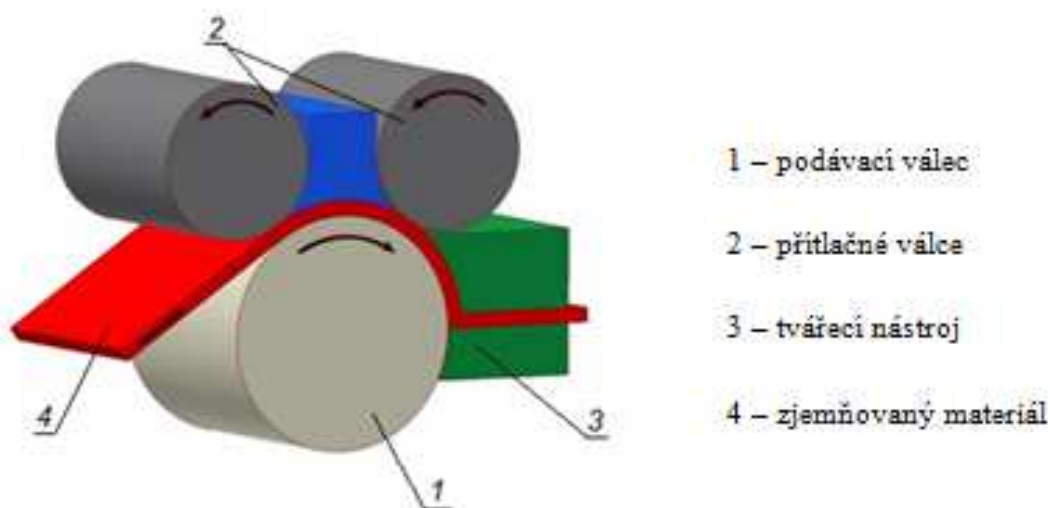


Obrázek 2 – Schéma zařízení CONFORM [5]

Při procesu zjemňování v zařízení CONFORM probíhají tyto pochody. Základní materiál o šíři 1,55 mm vedený pomocí podávacího válce a přítlačné kladky je přetvářen na šíři 1,45 mm. Dále je veden kanálem k opěrné vložce, po které se tře a je ohýbán směrem

k vložce tvářecího nástroje. V této vložce dochází k dislokaci mřížek a k samotnému zjemnění struktury. „Stupeň sklonu pro tuto metodu je $100 - 130^\circ$ “ [5]. Výstupní kanál má opět šíři 1,55 mm, a díky tomu nedochází k změně rozměrů upravovaného materiálu.

Popis zařízení DRECE



Obrázek 3 – Schéma procesu zpevňování v zařízení DRECE [5]

Upravovaný materiál má tvar plechu o rozměrech 57 x 2 x 1000 mm. Vkládá se do vstupního otvoru, kde dojde k sevření pásu mezi podávacím a přitlačnými válci, kterými je plech ohýbán při zachování jeho příčného průřezu. Dále je veden k tvářecímu nástroji z oceli typu Dievar, kterým je protlačován a dochází zde ke zjemnění struktury díky růstu dislokací od okrajů zrn základního materiálu. Po projití celého vzorku se postup opakuje do požadovaného zjemnění struktury.

Vstupní energii dodává elektromotor přenášející přes převodovku typu Nord a lamelovou spojku krouticí moment na podávací válec. Celý tento tvářecí proces probíhá za použití maziva pro zmenšení třecích sil.

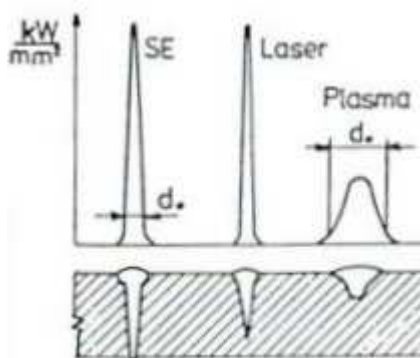
2 Rozbor technologií svařování, které jsou vhodné pro tento materiál

Základní, běžně používané technologie svařování způsobují velký odvod tepelné energie do základního materiálu. Tím vzniká široká oblast tepelně ovlivněného materiálu, která vlivem růstu zrn výrazně zhoršuje plastické vlastnosti (vrubovou a lomovou plasticitu), zvyšuje náchylnost k tvorbě trhlin (likvační, studené, žíhací) a zvyšuje možnost vzniku koroze pod napětím.

Námi vyrobený, zjemněný materiál, potřebujeme svařit takovým způsobem, aby došlo k co nejmenšímu tepelnému ovlivnění základního materiálu. K tomu můžeme použít metody svařování, které v minimální šíři tepelně ovlivňují základní materiál. Mezi tyto metody patří plasmové svařování, elektronové svařování, laserové svařování případně i TIG v pulzním režimu pro zmenšení množství vneseného tepla.

Tabulka 1 – Přehled parametrů vybraných druhů svařování [2]

Metoda	Hustota energie [W/cm ²]	Hloubka průvaru [mm]	Šířka/hloubka svaru	Svařovací rychlost [m/min]
Laser	$10^7 - 10^9$	25	0,1 – 0,5	až 10 m/min
Plasma	10^6	až 12	1	0,5 – 5
Elektronový paprsek	10^8	200	0,03	0,5 – 5



Obrázek 4 – Srovnání hustoty energie uvedených metod svařování [2]

2.1 Mikroplazmové svařování

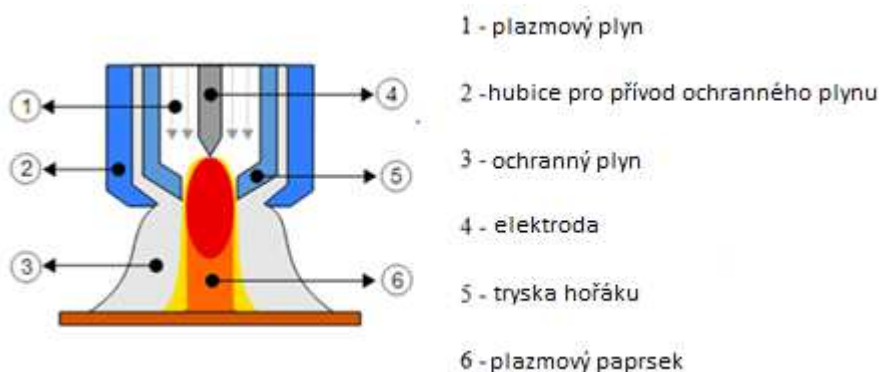
Plazmové svařování (označení 151 podle ČSN EN ISO 4063) je metoda velmi podobná svařovací metodou TIG. Plazmový plyn, který je přiváděn okolo wolframové elektrody, se vlivem zvýšení své teploty mění v plasmu (teplota řádově 10 000°C). Vzniklá plasma vystupuje z trysky velmi vysokou rychlostí a zapříčiní natavení základního materiálu ve velmi tenké vrstvě.

Přídavný materiál se používá ve formě prášků, drátů či plněných elektrod. Sekundární plyn (argon nebo směs argonu a helia) slouží k ochraně svarové lázně před vlivy okolního prostředí. Plazmový hořák je nutno kvůli vysokým teplotám chladit vodou.

Oproti metodě TIG tedy dochází k zúžení elektrického oblouku a koncentraci energie do užšího bodu. Což má za následek zvýšení rychlosti svařování a zmenšení šířky tepelně ovlivněné oblasti.

Plazmové svařování se dle parametrů dělí na tři způsoby:

- A. Mikroplazmové svařování – svařovací proud 0,1 – 20 A
- B. Středněplazmové svařování – Svařovací proud 20 – 100 A
- C. Svařování klíčovou dírkou – Svařovací proud nad 100 A



Obrázek 5 – Schéma plazmového svařování [6]

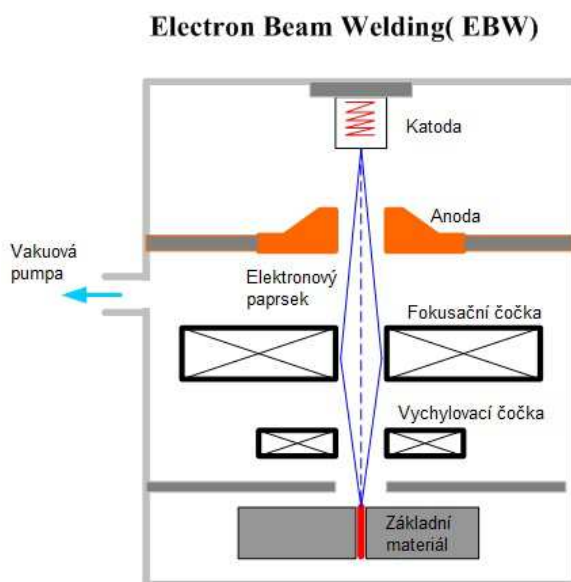
Jako nejdůležitější svařovací parametry se považují:

- svařovací proud – regulací proudu určujeme teplotu a výstupní tlak plazmy
- rychlost toku plazmového plynu – společně se svařovací rychlostí určují velikost penetrace
- svařovací rychlost – nabývá hodnot 20 až 30 cm/min

2.2 Elektronové svařování ve vakuu

Elektronové svařování ve vakuu (označení 511 podle ČSN EN ISO 4063), využívá k natavení základního svařovaného materiálu svazek elektronů urychlených v elektronovém dělu, které po dopadu na povrch materiálu přemění svou kinetickou energii na teplo.

Svařovací soustava se skládá ze žhavené záporné elektrody, na níž se pomocí termoemise uvolňují elektrony, které jsou následně urychleny anodou na rychlost 0,3 až 0,7 násobku světla. Napětí mezi katodou a anodou, jež urychluje elektrony, dosahuje hodnot 30 až 200 kV. Elektrony následně procházejí otvorem v anodě. Fokusační čočka soustřeďuje uvolněné elektrony do ohniska, do kterého se umísťuje svařovaný materiál. Vychylovací čočka slouží k vychýlení či zaostření paprsku elektronů. Celá svařovací soustava i se svarovou konstrukcí, se umísťuje do vakuové komory. Tato komora má za úkol zajistit termoemisi elektronů mezi katodou a anodou, chemickou a tepelnou izolaci katody a znemožnit vznik oblouku mezi katodou a anodou. Vakuum má také vliv na vznikající svarový kov, na který tidíž nemá vliv vodík ani další chemické prvky obsažené ve vzduchu negativně ovlivňující svarový kov.



Obrázek 6 – Schéma soustavy elektronového svařování [7]

Elektronové svařování vyhovuje i těm nejnáročnějším požadavkům v leteckém a kosmickém oboru. Využívá se i pro svařování velmi aktivních kovů (titan, zirkon,

molybden, wolfram, niob aj.), které mají velkou afinitu ke kyslíku, vodíku a dusíku. Elektronovým svařováním můžeme svařovat i kombinace základních materiálů jako Ti-Al, CrNi ocel-Al, Cu-Al, a jiné.

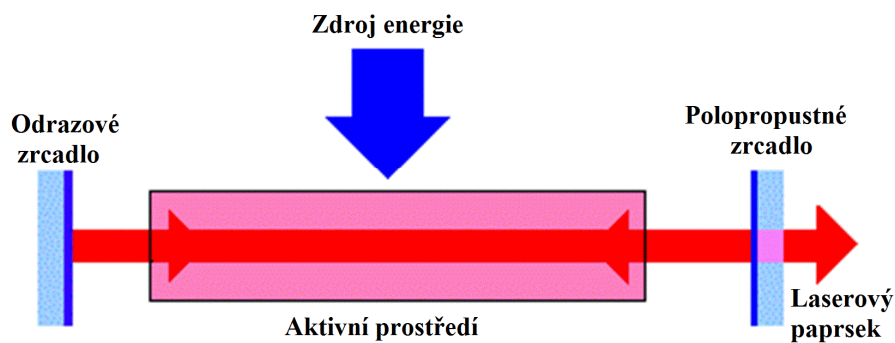
Mezi nejdůležitější výhody elektronového svařování patří:

- možnost svařování velkých tlouštěk materiálu (0,1 až 200 mm)
- úzce natavený povrch základního materiálu, společně s malou šířkou tepelně ovlivněné oblasti
- dokonalá ochrana svarového kovu proti účinkům atmosféry díky vakuu
- svařování na jeden průchod paprsku
- rafinační účinky vakua

2.3 Laserové svařování

Název LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) v anglickém jazyce vysvětluje základní princip činnosti, což v překladu znamená zesílení světla stimulovanou emisí záření.

Laser je tvořen zdrojem energie, aktivního prostředí a rezonátoru. Zdroj energie dodává do aktivního prostředí energii, vybuzující elektrony aktivního prostředí do vyšších energetických hladin, a dojde k tzv. excitaci. Při opětovném snížení hladiny elektronů dojde k emisi kvanta energie ve formě fotonů. Tyto fotony interagují se zbývajících elektrony a spouští se mechanismus stimulované emise fotonů. „Díky umístění aktivní části laseru do rezonátoru, tvořeného například zrcadly, dochází k odrazu paprsku fotonů a jeho opětovnému průchodu prostředím“. [11] To má za následek podporu stimulovanou emisi a exponenciální zesilování toku energie. V polopropustném zrcadlu je vytvořen otvor, kterým vychází požadovaný laserový svazek fotonů.



Obrázek 7 - Princip laseru [8]

Stejně jako u předešlých metod tak i laserové svařování (označení 751 podle ČSN EN ISO 4063) je charakteristické úzkou tepelně ovlivněnou oblastí, hloubkou závaru a kvalitou svaru oproti konvenčním metodám. Navíc se dá tato metoda velmi dobře robotizovat.

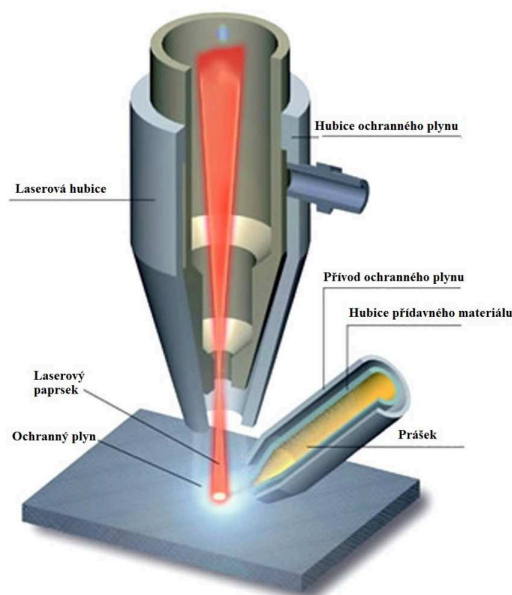
Svařování laserem můžeme rozdělit na dvě metody:

- vedením tepla – základní materiál absorbuje laserový paprsek a dochází k natavení malé vrstvy materiálu. Metoda je použitelná pro malé hloubky závaru. Této metody se využívá při pulzním svařování s nízkou opakovací frekvencí – svarovou housenku tvoří řada bodů, vytvořených pulzy laseru, ztuhlých úplně nebo částečně. Housenka má malou hloubku závaru. Používá se pro malosériovou či kusovou výrobu, při spojování tenkých plechů, u obtížně svařovaných materiálů a u konstrukcí, které nedovolují použití jiných metod z důvodu konstrukčního uspořádání.
- klíčovou dírkou – při zvýšení výkonu laseru dochází k odpařování materiálu a vytváří se kapilára, která je naplněna ionizovanými výpary odpařeného kovu a její stěny tvoří roztavený kov. Tím jak dochází k posuvu laseru ve směru svařovaných ploch, dochází za klíčovou dírkou k opětovnému spojení materiálů vlivem působení povrchového napětí roztaveného kovu a vzniká svarové spojení.

V průběhu svařování dochází v kapiláře k odpařování materiálu a jeho přeměny na plazmu. Tato plazma nemá příliš velký vliv na zmenšení množství energie laserového paprsku. Pokud ale dojde k ionizaci ochranné atmosféry nad povrchem materiálu, vzniklá plazma významně pohlcuje energii laserového paprsku a svařování se stává méně účinné.

Pro odstranění tohoto efektu používáme ofukování ochrannou atmosférou s heliem. Jelikož je ale helium finančně velmi nákladné, používáme ochranné směsi He/N₂ nebo He/Ar.

Přídavné materiály mají formu drátu, přidávaného do svaru či plnící kovové vložky. Slouží pro doplnění chybějícího materiálu svarového kovu, při úpravě chemického složení nebo krystalizaci svaru.



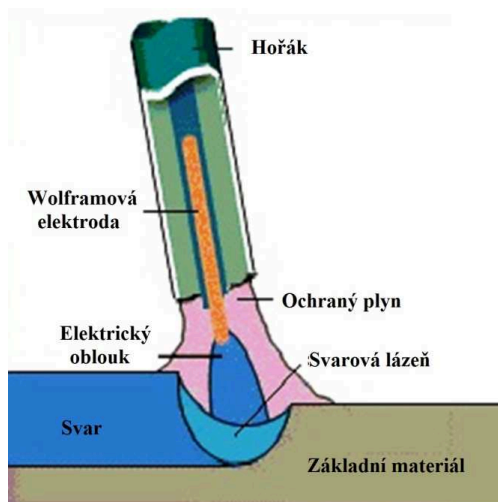
Obrázek 8 – Laserová hubice [9]

Z konstrukčního hlediska dělíme lasery do tří skupin

- pevnolátkové (Nd-YAG) – aktivní prostředí je tvořené neodymem a izotropním krystalem Yttrium Aluminium Granátu. Tyto lasery mají rozsah výkonů v rozmezí od 50 W do 10 kW. Malými výkony vytváříme svary malých rozměrů a pro mikrosvařování (svařování dílů s extrémní přesností). Velké výkony slouží pro svařování vysokými rychlostmi, u svarů s hlubokým závarem a malou deformací. Paprsek se k místu svaru dopravuje optickým vláknem.
- plynové (CO₂ a excimerové lasery) – u CO₂ laseru je aktivní prostředí tvořeno směsí plynů CO₂, N₂, H₂ a He, avšak stimulovaná emise probíhá pouze v molekulách CO₂. Výkony laserů jsou v rozmezí 50 W až 20 kW. Problémem je doprava paprsku k místu svaru. Kvůli velké vlnové délce nelze paprsek dopravovat optickým kabelem, proto používáme odrazová zrcadla.
- polovodičové (diodové) – kvůli nižšímu výkonu (50W až 6 kW) se používají pro svařování plastů nebo navařování materiálů.

2.4 TIG-v pulzním režimu

Při metodě svařování TIG (označení 141 podle ČSN EN ISO 4063), hoří elektrický oblouk v ochranném inertním plynu mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Jako ochranný plyn se používá argon nebo směs argonu a hélia, a slouží pro ochranu oblouku, tavné lázně a elektrody před účinky vzdušného kyslíku, který způsobuje oxidaci, naplynění, pórovitost a propal prvků ve svaru.



Obrázek 9 – Svařování TIG [10]

TIG svařování se nejvíce používá při svařování obtížně svařovatelných kovů s vysokou afinitou ke kyslíku. Je oblíbenou metodou při svařování hliníku a jeho slitin, při svařování různorodých materiálů např. ocel s mědí, bronzem nebo niklovými slitinami. Z důvodu vzniku pórů ve svaru, a z ekonomického hlediska se však příliš nepoužívá pro svařování uhlíkové oceli. Přídavný materiál ve formě drátů je možno podávat ručně či automatizovaně s proměnnou rychlostí podávání drátu.

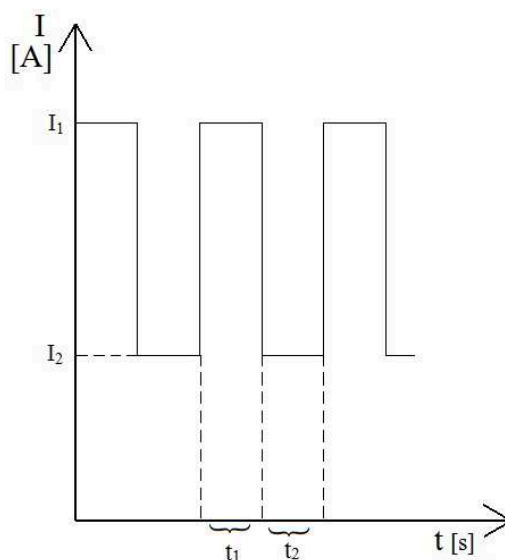
Střídavý proud se používá pro svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin. Také se používá při znečištění základního materiálu, kdy v průběhu svařování probíhá lepší odpařování nečistot z tavné lázně.

Stejnoseměrný proud se zapojením elektrody na záporný pól (přímá polarita), vytváří hluboký závar. Využívá se při svařování ocelí, mědi, niklu titanu a jejich slitin. Nepřímá polarita se v praxi příliš nevyužívá, kvůli vysokému tepelnému namáhání wolframové elektrody. Jelikož se wolframová elektroda netaví je nutno hořák ochlazovat vodou.

Pulzní režim

Pulzní svařování neboli svařování v pulzu nepracuje s nastavením proudu na konstantní hodnotě jako u většiny konvenčních druhů svařování, ale s harmonicky se měnící hodnotou proudu mezi hodnotami I_1 a I_2 . Vyšší hodnota proudu I_1 slouží k vytvoření svarové lázně a korigování průvaru, nižší hodnota I_2 slouží k ionizaci oblouku, při kterém oblouk sice hoří, ale nenatavuje materiál, což vede k ochlazení svaru a k zúžení tepelně ovlivněné oblasti. Hodnota proudu I_2 bývá nastavována buď manuálně, nebo si jej svářecí zdroj nastaví automaticky podle velikosti proudu I_1 .

Vzhledem k časové závislosti při střídání hodnot I_1 a I_2 hovoříme o běžném pulzu (0,25 až 25 Hz) nebo o vysokorychlostním pulzu (20 až 600 Hz). Běžný pulz je vhodný pro svařování tenkých plechů a nerezových materiálů. Vysokorychlostní pulz více koncentruje energii a tím dochází k zúžení TOO. Charakteristika průběhu svařovacího proudu zobrazuje obr. 10.



Obrázek 10 – Pulzní charakteristika proudu

3 Experimentální část

3.1 Charakteristika oceli 1.1203

Ocel třídy 1.1203 dle ČSN EN 10027-2 (12 060 dle ČSN 42 002), je ocel určená k zušlechťování a povrchovému kalení. Ve většině případů se používá pro výrobu hřídelí turbokompresorů, zalomených a jiných hřídelí. Ocel je také vhodná pro výrobu ozubených kol, ozubených věnců, vřeten, pístnic a různých spojovacích zařízení.

Tabulka 2 - Chemické složení oceli 1.1203 [4]

C	Si	Mn	Al	P	S
[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]	[hm. %]
0,1	0,03	0,43	0,02	0,030	0,035

Tabulka 3 - Mechanické vlastnosti oceli 1.1203 [4]

R _m	R _{p0,2}	Tvrdost HV 10	Tažnost A _{80mm}
[MPa]	[MPa]		[%]
549	345	176	21,1

3.2 Úprava a svaření vzorků

Nastříhané vzorky oceli 1.1203 neupraveného materiálu a upraveného materiálu zařízením 6xDRECE o šíři 48 mm a tloušťce 2 mm, byly nejprve zarovnány na metalografické brusce pro odstranění části materiálu ovlivněného stříháním. Po očištění vzorků od řezné kapaliny a upevnění ke stolu, bylo provedeno svaření metodou TIG v pulzním režimu s mechanizovaným posuvem s parametry uvedenými v tabulce 4. Svařování probíhalo při použití ochranného plynu argonu s průtokem 12 až 14 l/min a zápornou polaritou.



Obrázek 11 – Ustavení vzorků



Obrázek 12 – Svařovací zdroj

Tabulka 4 – Parametry svařování

Vzorek	Proud I_1 [A]	Proud I_2 [A]	Napětí U_1 [V]	Napětí U_2 [V]	t_1 [s]	t_2 [s]	Svařovací rychlost [cm/min]
A-1-Výchozí stav	80	30	13	10	0,7	0,1	13,3
A-2-Výchozí stav	40	13	9	8	0,7	0,1	11,3
B-3-DRECE 6x	40	13	9	8	0,7	0,1	11,3
B-4-DRECE 6x	40	13	9	8	0,7	0,1	8,8

Po svaření všech vzorků bylo zhodnoceno, že nejvhodněji zvolené parametry měly vzorky A-2 a B-4, a byly vybrány pro další experimentální činnost.



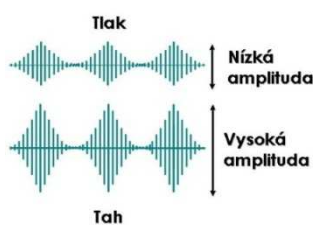
Obrázek 13 – Vzorky A-1 a A-2



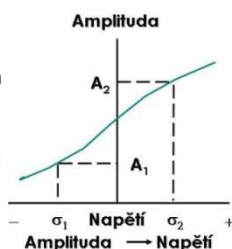
Obrázek 14 – Vzorky B-3 a B-4

3.3 Analýza zbytkových napětí

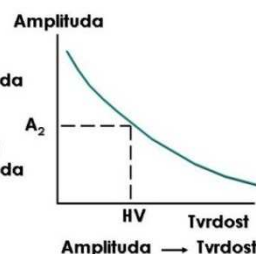
Analýza zbytkových napětí patří mezi nedestruktivní, nepřímé metody měření mechanických vlastností feromagnetických materiálů, dávající nám představu o homogenitě mechanických vlastností na povrchu vzorků. „Metoda pracuje s využitím Barkhausenova magnetického šumu. Zjednodušeně se dá tato metoda popsat jako odezva materiálu na působení magnetického pole.“ [3] Výstupní jednotkou u tohoto měření je mV, kterou lze převést pomocí kalibračních křivek na jednotky napětí nebo tvrdosti. U materiálů jako je železo, ocel či kobalt tahové napětí intenzitu Barkhausenova šumu zvyšuje a tlakové napětí intenzitu snižuje viz. obr. 15. Podobný vliv na intenzitu Barkhausenova šumu má i tvrdost. Vysoká tvrdost intenzitu Barkhausenova šumu snižuje a nízká tvrdost zvyšuje viz. obr. 16.



Obrázek 15 – Vliv Barkhausenova šumu
v závislosti na napětí [3]

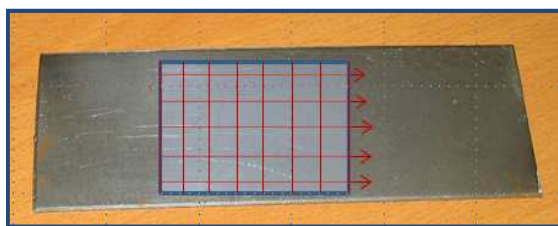


Obrázek 16 – Vliv Barkhausenova šumu
na tvrdost [3]

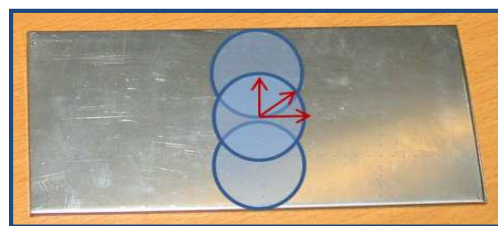


Postup měření vzorků A2 a B4

Měření probíhalo pomocí mřížkové a polární metody. U mřížkové metody bylo měření prováděno na ploše o rozměrech 100 x 35 mm z obou stran vzorku, kdy čelní strana tj. strana přilehlá TIG hořáku je označena písmenem A, a strana s kořenem svaru písmenem B. Polární metodou byly měřeny vlastnosti vždy ve středu vzorku a to jak před svařením, tak i po svaření. Úhel natočení čidla mezi jednotlivými měřeními byl 22,5°.

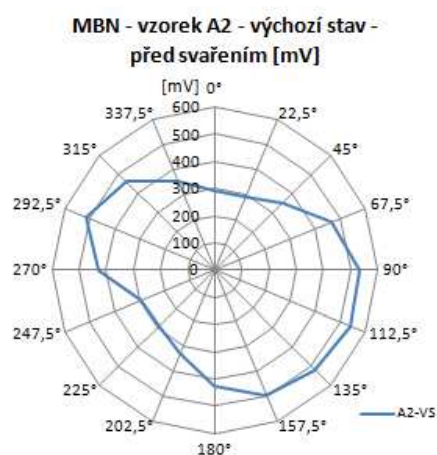


Obrázek 17 – Plošné měření na
mřížkovém rastru [4]

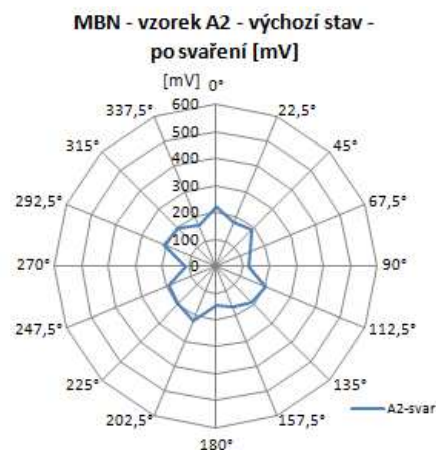


Obrázek 18 - Polární měření [4]

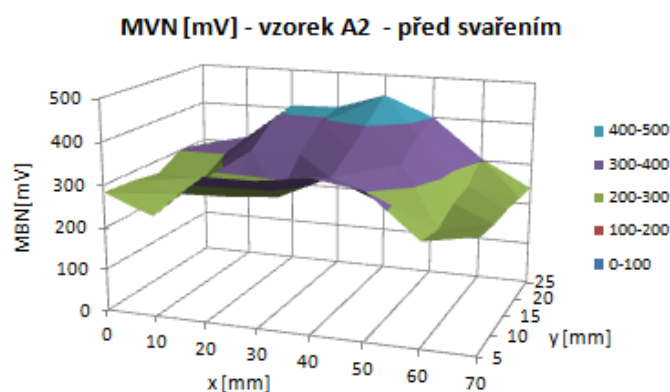
Grafy naměřených hodnot materiálu ve výchozím nezpracovaném stavu:



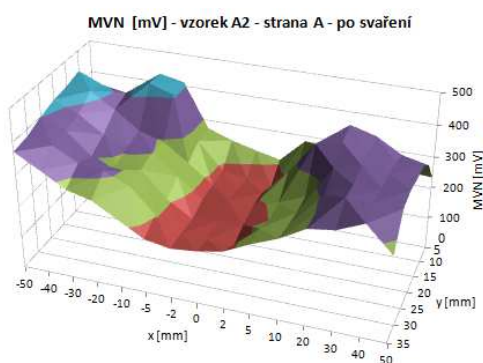
Obrázek 19 – Polární měření – měření MBN vzorku A2 výchozího stavu před svařením



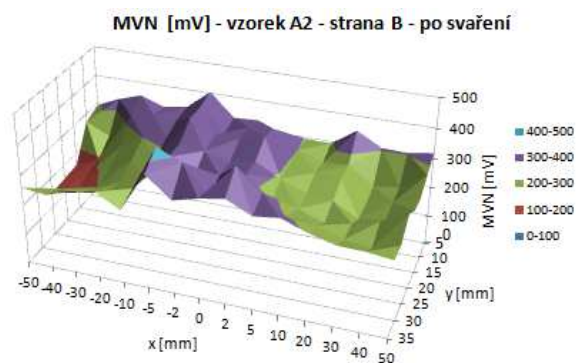
Obrázek 20 – Polární měření – měření MBN vzorku A2 výchozího stavu po svaření



Obrázek 21 – Prostorový graf měření MBN na ploše vzorku A2 před svařováním

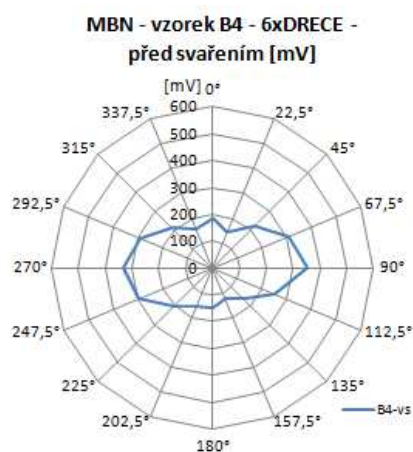


Obrázek 22 - Prostorový graf měření MBN na ploše vzorku A2 ze strany A po svařování

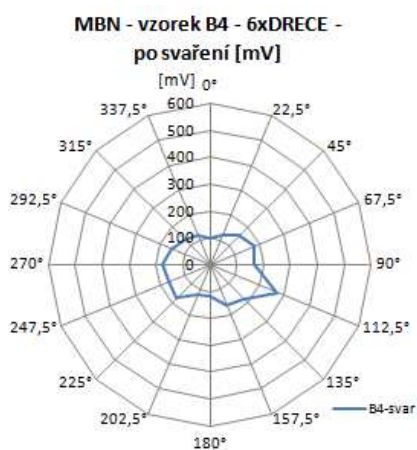


Obrázek 23 - Prostorový graf měření MBN na ploše vzorku A2 ze strany B po svařování

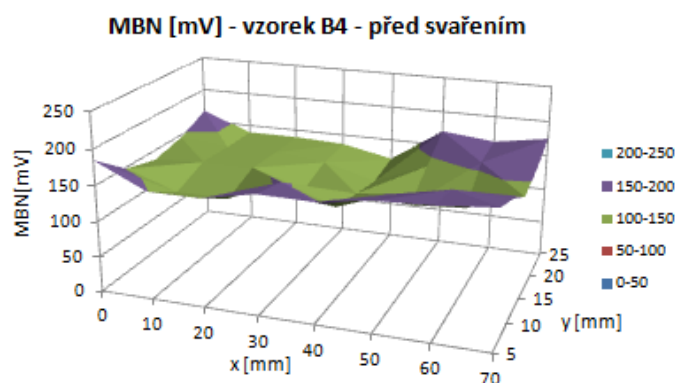
Grafy naměřených hodnot zpracovaného materiálu 6xDRECE:



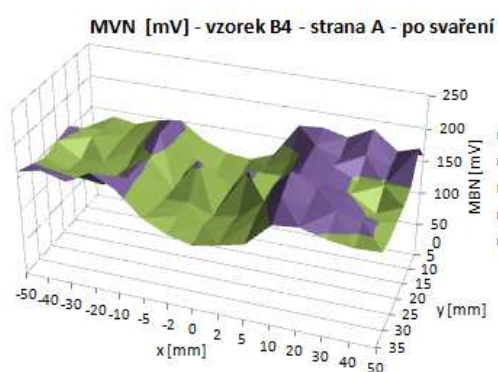
Obrázek 24 – Polární měření – měření MBN vzorku B4 před svařením



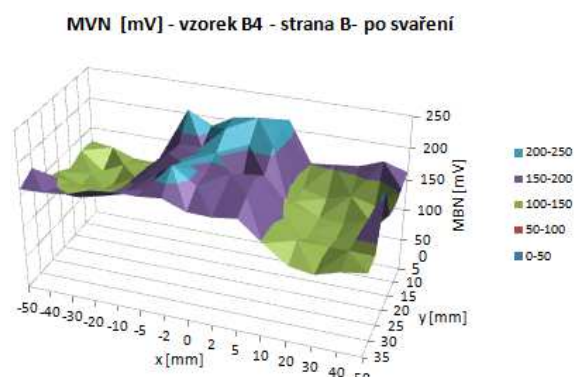
Obrázek 25 – Polární měření – měření MBN vzorku B4 po svaření



Obrázek 26 - Prostorový graf měření MBN na ploše vzorku B4 před svařováním



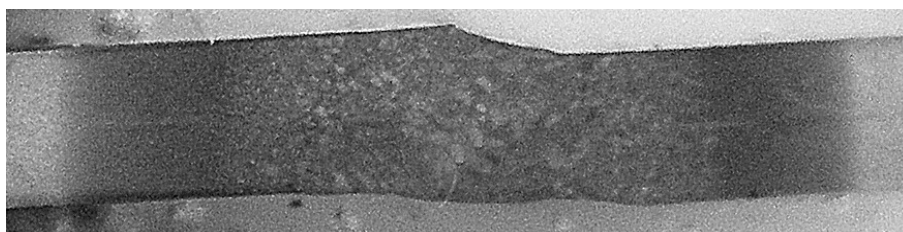
Obrázek 27 - Prostorový graf měření MBN na ploše vzorku B4 ze strany A po svařování



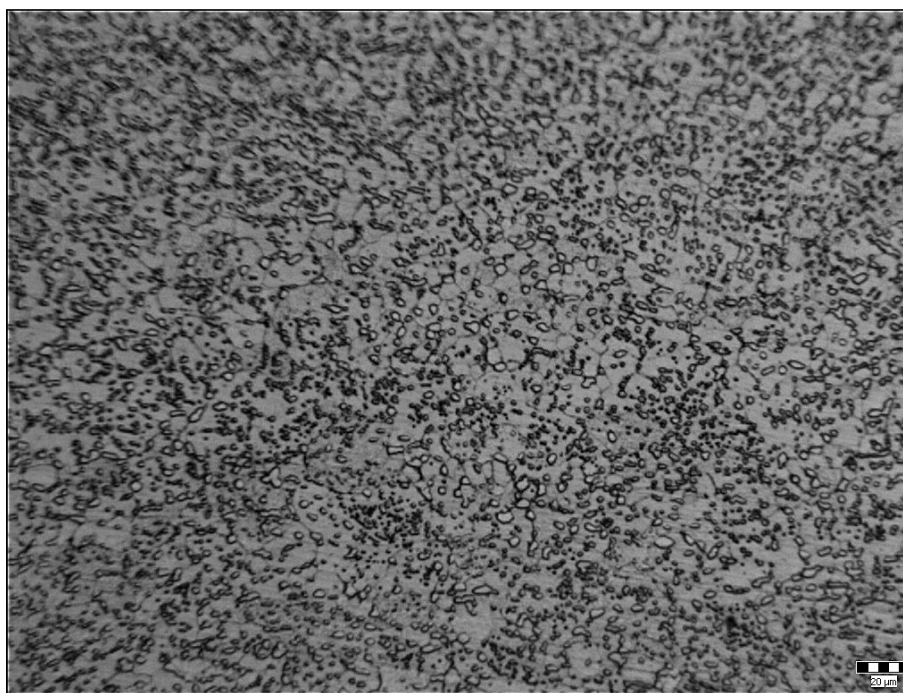
Obrázek 28 - Prostorový graf měření MBN na ploše vzorku B4 ze strany B po svařování

3.4 Makrostruktura a mikrostruktura svaru

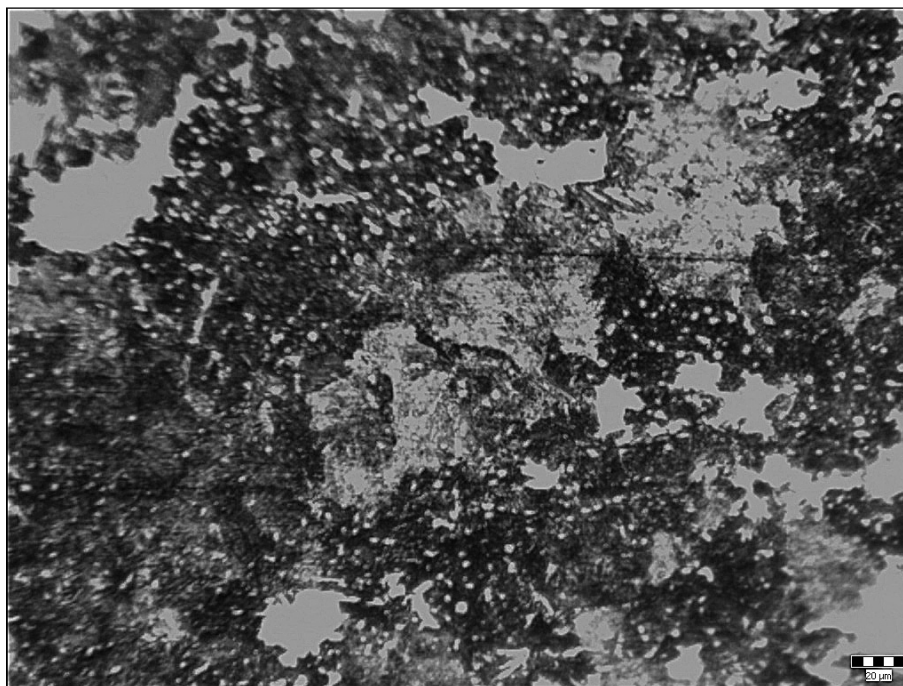
Svažené vzorky byly po měření zbytkových napětí rozřezány kolmo k ose svaru metalografickou bruskou a tato plocha řezu byla dále upravena broušením na metalografických papírech s klesající zrnitostí a leštěním. Po tomto procesu proběhlo naleptání 1% Nitalem (1% roztok HNO_3 v etylalkoholu) pro zviditelnění struktury kovu. Výsledky metalografických pozorování jsou na straně 29.



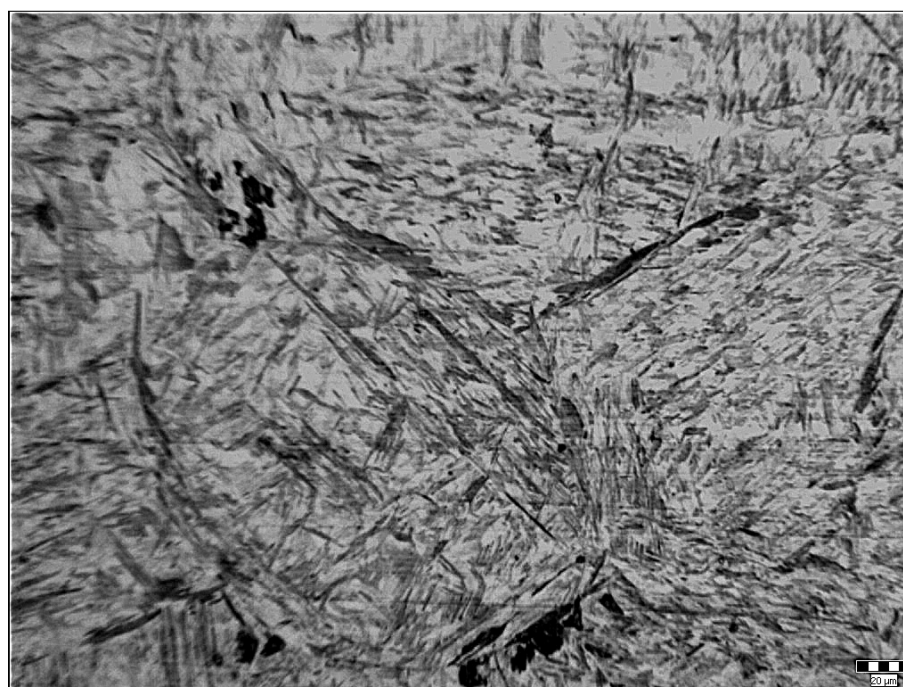
Obrázek 29 – Vzorek A2 – Makrostruktura (zv. 10x)



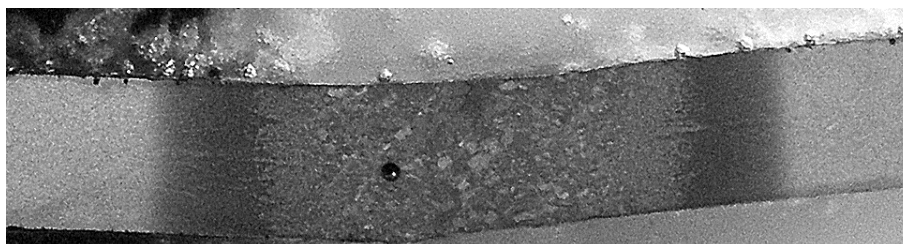
Obrázek 30 – Vzorek A2 - Tepelně neovlivněný základní materiál (zv. 200x)



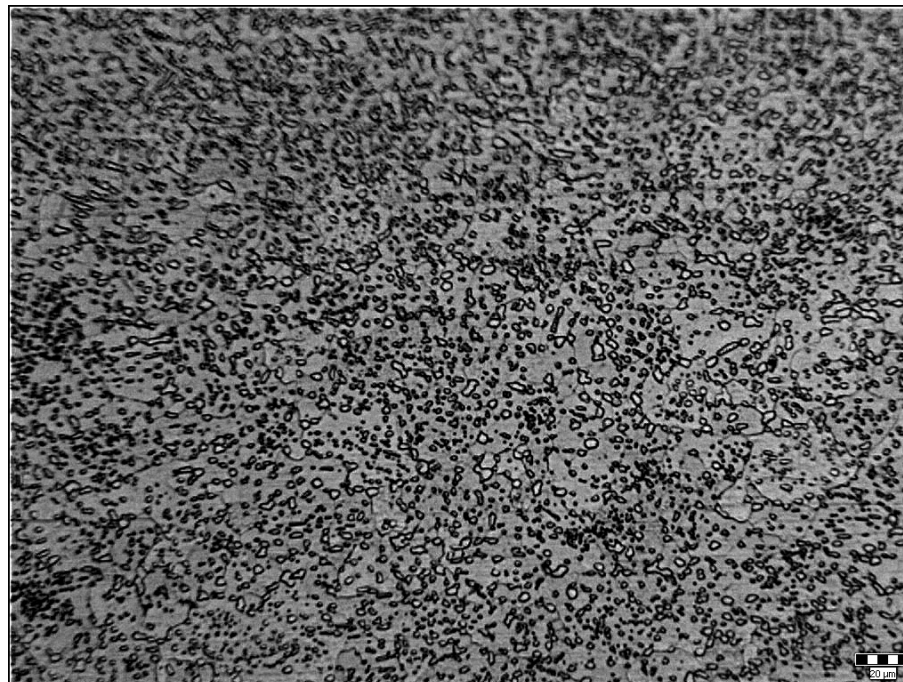
Obrázek 31 – Vzorek A2 - Přehřátá oblast (zv. 200x)



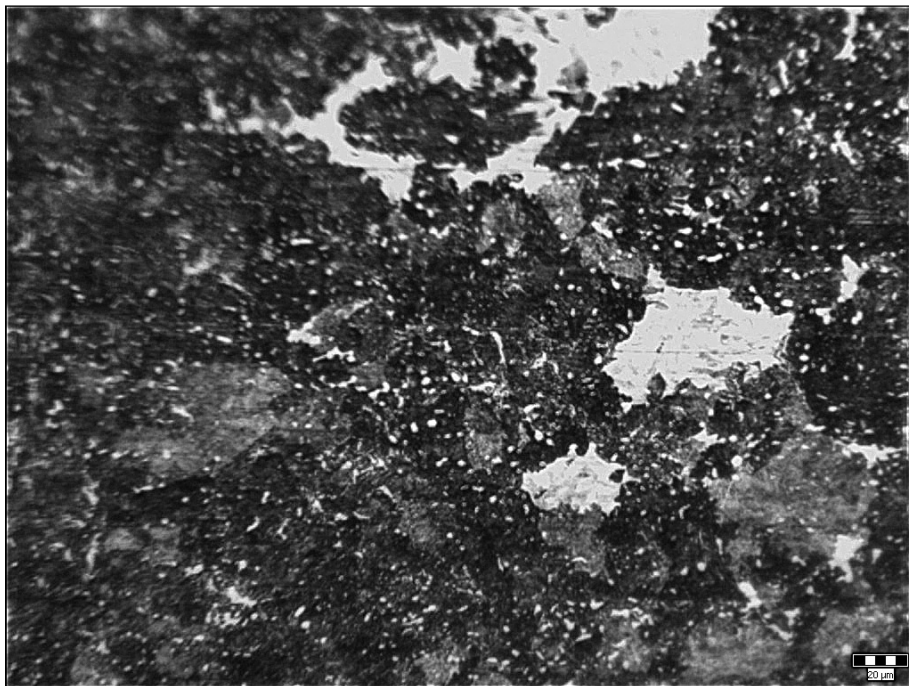
Obrázek 32 – Vzorek A2 - Svarový kov (zv. 200x)



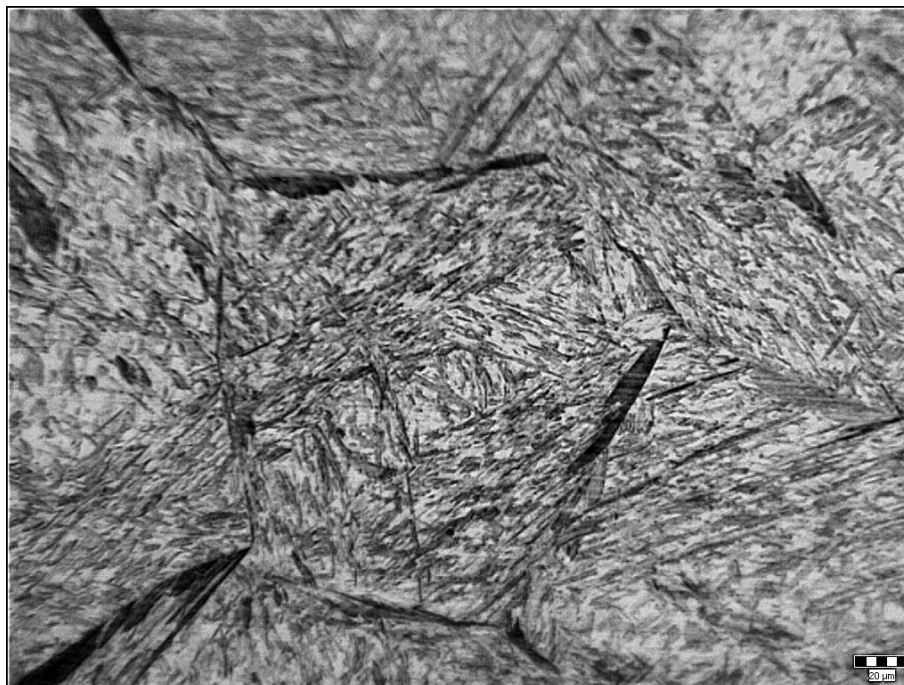
Obrázek 33 – Vzorek B4 – Makrostruktura (zv. 10x)



Obrázek 34 – Vzorek B4 - Tepelně neovlivněný materiál (zv. 200x)



Obrázek 35 – Vzorek B4 - Přehřátá oblast (zv. 200x)



Obrázek 36 – Vzorek B4 – Svarový kov (zv. 200x)

Výsledky metalografických pozorování

Hodnocení makrostruktury svarů

Makrostruktura vzorku A2 je zobrazena na obr. 29. Při ustavování vzorku A2 před svařováním došlo k přesazení a vzniklý svarový spoj je přesazen o 0,5 mm. Toto přesazení nedegradovalo průřez svaru a přechod mezi oběma plechy má konstantní tloušťku 2 mm. Svar nejeví vnitřní vady. Šířka svarového kovu činí 3,5 mm. Šířka oblasti TOO hrubého zrna mezi svarovým kovem a oblastí normalizace činí 1,5 mm. Šířka TOO mezi hrubým zrnem a neovlivněným základním materiálem činí 2 mm.

Makrostruktura vzorku B4 je zobrazena na obr. 33. Plechům vlivem upravení v zařízení DRECE byla narušena rovinnost, a v podélném směru byly prohnuty. Při ustavování zdeformovaných plechů toto prohnutí nešlo odstranit, takže plechy byly svařeny s vychýlením o 9 °, avšak toto vychýlení nemá vliv na zkoušené vlastnosti. Ve svaru se objevila vnitřní vada ve formě vměstku o průměru 0,2 mm. Šířka svarového kovu činí 3,7 mm. Šířka oblasti TOO hrubého zrna činí 1 mm. Šířka TOO mezi hrubým zrnem a neovlivněným základním materiálem činí 1,2 mm.

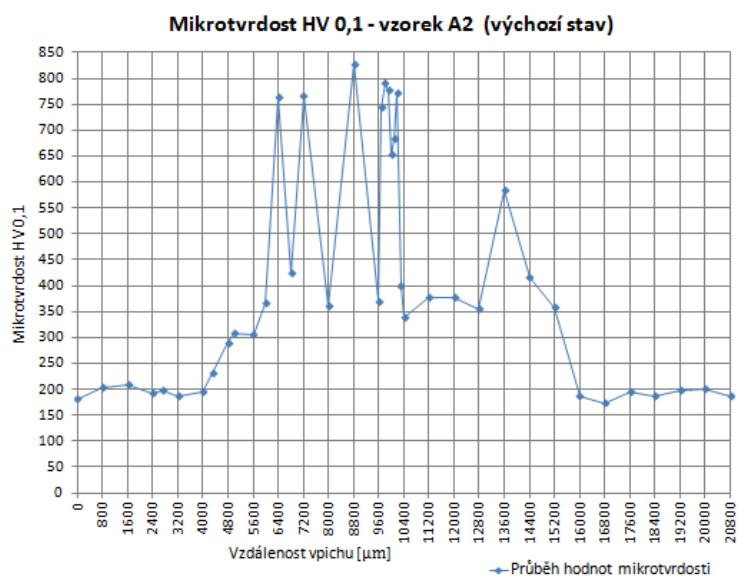
Hodnocení mikrostruktury svarů

Jelikož jsou vzorky stejného chemického složení, tak nejsou viditelné rozdíly mezi obsaženými strukturními fázemi a složkami, pouze v jejich rozložení a tvaru.

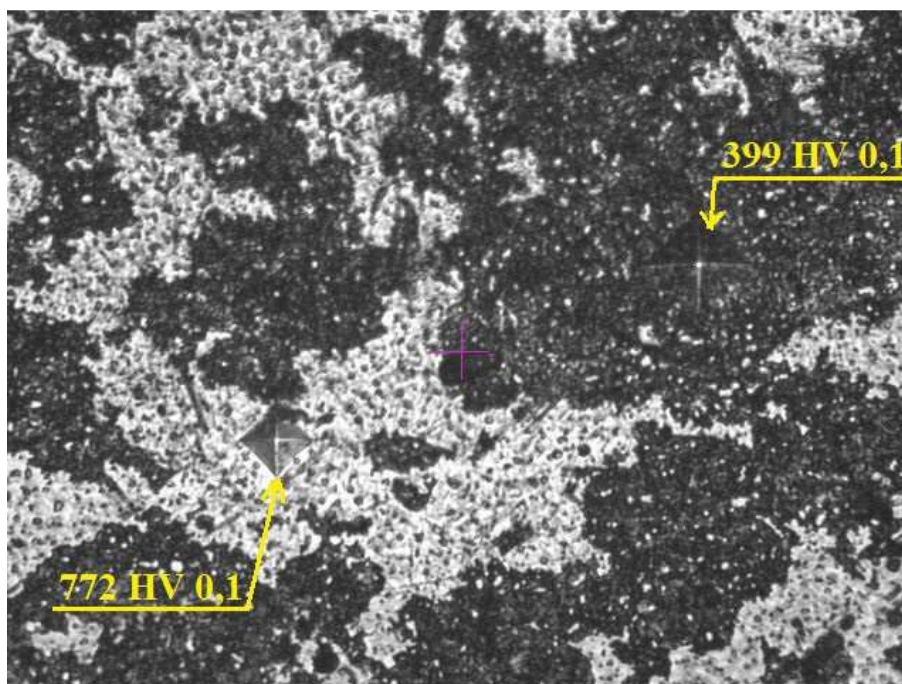
Základní, teplem neovlivněný materiál (obr. 30 a 34) je tvořený sferoidizovaný perlitem. Oblast částečné překrystalizace (příloha A a E) nacházející se mezi teplotami A_{c1} a A_{c3} má feriticko-perlitickou strukturu s jemně lamelárním perlitem. Oblast normalizace (příloha B a F) je charakteristická feriticko-perlitickou strukturou. Přehřátá oblast (obr. 31 a 35) obsahuje hrubé zrna martenzitu, sferoidizovaný cementit a desky terciálního cementitu. Svarový kov (obr. 32 a 36) je charakteristický hrubozrnnou martenzitickou strukturou s vyloučeným terciálním cementitem na hranicích zrn. Ve vzorku A2 došlo při tuhnutí roztaveného kovu k tvorbě martenzitických jehlic (příloha C).

3.5 Měření mikrotvrdosti

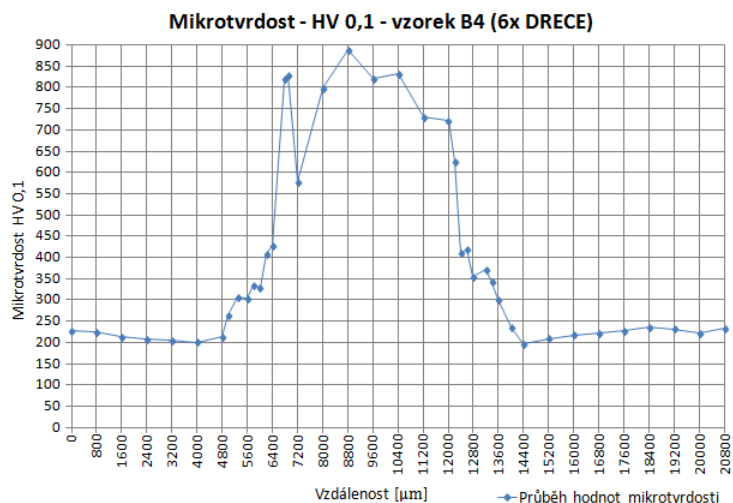
Vyleštěné a naleptané vzorky byly podrobeny zkoušce mikrotvrdosti podle Vickerse HV 0,1. Vzdálenosti mezi jednotlivými vtisky byly 800 μm a po zjištění průběhu hodnot mikrotvrdosti byla změřena tvrdost v náběžích na nejvyšší hodnoty v TOO. Grafy průběhů hodnot ve svarové oblasti zobrazují obrázky 37 a 39.



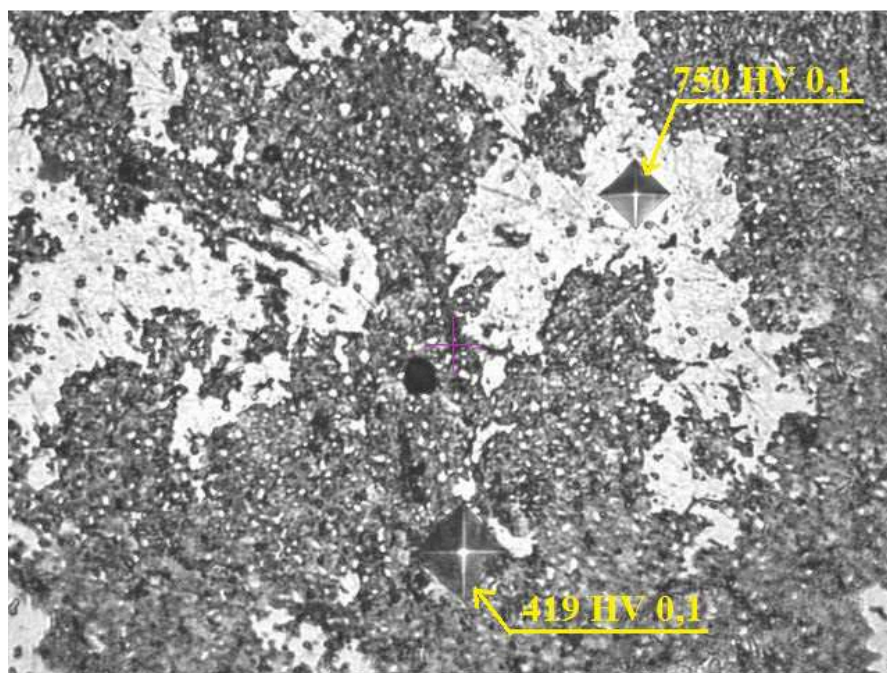
Obrázek 37 – Graf průběhu hodnot mikrotvrdosti svaru ve vzorku A2



Obrázek 38 – Naměřené hodnoty mikrotvrdosti v TOO – vzorek A2 (1000x)



Obrázek 39 – Graf průběhu hodnot mikrotvrdosti svaru ve vzorku B4



Obrázek 40 - Naměřené hodnoty mikrotvrdosti v TOO – vzorek B4 (1000x)

Vyhodnocení měření mikrotvrdosti

Z měření vyplívá, že upravením materiálu procesem DRECE se zvýší tvrdost základního materiálu z průměrných 186 na 225 HV 0,1. To je zvýšení o přibližných 40 HV 0,1. Při porovnání vlivu svařování na tvrdost ve svaru vzorku A2 a B4, lze pozorovat toto zvýšení hodnot i v ostatních částech svaru jako je TOO a svarový kov.

Přehřátá oblast charakteristická strukturou terciálního cementitu a martenzitu je u obou vzorků zobrazena na obr. 38 a 40. Tato oblast s velkým gradientem tvrdosti obsahuje martenzit dosahující hodnot kolem 400 HV 0,1, a terciální cementit dosahující tvrdosti do 800 HV 0,1. Ve svarovém kovu složeném z velkých zrn martenzitu na krajích s vyloučeným cementitem_{III}, vzrostla průměrná hodnota tvrdosti ze 780 na 830 HV 0,1. Rozdíl mezi nejvyšší dosaženou tvrdostí ve svarovém kovu u vzorků A2 a B4 byl 60 HV 0,1.

Veliký rozptyl hodnot mikrotvrdosti u vzorku A2 vznikl v důsledku zvoleného typu měření. Zvolená mikrotvrdost HV 0,1 dovoluje měřit tvrdosti v jednotlivých strukturních složkách, což u měření s vyšším zatížením nelze.

3.6 Diskuze dosažených výsledů

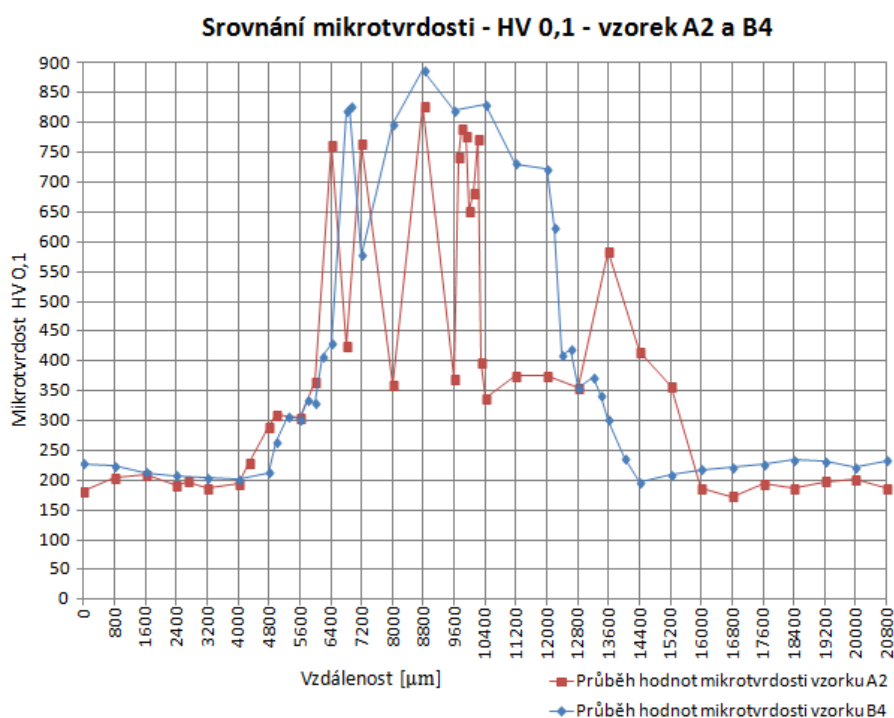
Analýza zbytkových napětí byla provedena za účelem zjištění rozložení tahových a tlakových napětí ve svaru. Při porovnání vlivu svařování na neupravený materiál a materiál upravený vícenásobnou plastickou deformací bylo zjištěno, že v průběhu svařování došlo k postupnému ochlazování svarové lázně ze strany B tj. strana kořenu svaru a došlo ke vzniku tahových napětí na této straně. Materiál na straně A krystalizoval poslední, což zapříčinilo vznik tlakových napětí, která jsou v grafech nižší než výchozí hodnoty MVN.

Pomocí makrostruktury byla zjištěna šířka tepelně ovlivněné oblasti, která činí 3,5 mm u vzorku A2 a 2,2 mm u vzorku B4. Tyto rozměry byly měřeny od neovlivněného základního materiálu po začátek oblasti svarového kovu. Také byly zjištěny svarové nedokonalosti ve formě vměstku u vzorku B4 a tvarových nepřesností u obou vzorků, které však nemají vliv na funkčnost svaru díky neovlivnění tloušťky průřezu. Kořen byl provařen správně a nejeví žádné vady.

U vzorku A2 zaujímá svarový kov a TOO po obou stranách 10,5 mm, u vzorku B4 pouze 8,5 mm díky nižší rychlosti svařování. U běžných technologií svařování s konstantní charakteristikou svařovacího proudu, nižší rychlost svařování zapříčiní vnesení většího množství tepelné energie do materiálu. V našem případě došlo u pulzního nastavení při zmenšení rychlosti svařování k zefektivnění využití délky nižší hodnoty proudu (na jednotku délky připadlo více „pauz“), což vedlo ke zmenšení šířky TOO u vzorku B4.

Struktura kovu byla vyhodnocena pomocí pozorování na metalografických výbrusech a zjištěné strukturní složky byly ověřeny měřením mikrotvrdosti. Jelikož jsou vzorky stejného chemického složení, nevznikly rozdíly mezi vzniklými strukturami kovu, pouze v rozložení jednotlivých strukturních fází a složek. U vzorku A2 se ve svarovém kovu vytvořili martenzitické jehlice (příloha C), které společně s vyšším obsahem cementitu, zapříčinily kolísání hodnot mikrotvrdosti ve svarovém kovu u tohoto vzorku.

Nejvyšší naměřené hodnoty mikrotvrdosti dosahuje oblast svarového kovu, který obsahuje směs velkých martenzitických zrn s cementitem_{III} o tvrdosti 830 HV 0,1 u vzorku A2 a 890 HV 0,1 u vzorku B4. Srovnání průběhu mikrotvrdosti lze pozorovat na obr. 41. Ze srovnání naměřených hodnot mikrotvrdosti lze pozorovat, že počáteční zvýšení tvrdosti důsledkem zpracování procesem DRECE se projevuje v TOO hrubého zrna i ve svarovém kovu. Vyžíhaná oblast vzorku B4 zaznamenala pokles tvrdosti na původní hodnotu před vícenásobnou plastickou deformací.



Obrázek 41 – Srovnání průběhů mikrotvrdosti HV 0,1

4 Závěr

Bakalářská práce se zabývá vlivem svařování na nízkouhlíkovou ocel zpracovanou technologií vícenásobné plastické deformace. Toto zpracování materiálů je velice perspektivní, avšak je zapotřebí vyřešit technologickou část dalšího použití, jelikož polotovary vytvořené zpracováním v zařízení DRECE je relativně malý a těžko hledá technologické uplatnění v konstrukcích. Kvůli tomu je potřeba tyto pásy určitou formou spojit do větších celků. V této práci byla zvolena technologie svařování, jakožto zástupce produktivního a relativně nízko nákladového způsobu spojení. Získaný výsledek celkového vlivu svařování najde uplatnění v podnicích, které by se chtěly zabývat výrobou materiálů upravených metodami SPD.

Teoretická část se zabývá možnostmi vhodných druhů svařování, které spojuje schopnost v co nejmenší možné šíři ovlivnit základní materiál. Mezi ně řadíme svařování laserem, elektronovým paprskem, plazmou a svařování metodou TIG v pulzním režimu. Dále jsou v teoretické části představeny metody zpracování na výrobu SPD materiálů, a to CONFORM a DRECE, které mají společný charakter procesu zjemňování.

Experimentální část se zabývá zkoumáním vlivu svařování na upravený materiál vícenásobnou plastickou deformací, kterou vytvořilo zařízení DRECE po šesti zpracováních. Vzorky základního neupraveného materiálu a upraveného materiálu zařízením DRECE byly svařeny metodou TIG v pulzním režimu. Takto byly zhotoveny čtyři vzorky, ze kterých byly následně vybrány dva s nejvhodněji vybranými parametry. Data k vyhodnocení vlivu svařování poskytla analýza zbytkových napětí na povrchu vzorků, a měření mikrotvrdosti spjaté se zkoumáním struktur svaru.

Analýza zbytkových napětí ve svaru ukázala rozložení tahových a tlakových sil ve svaru a jeho blízkém okolí. U vzorku zpracovaného vícenásobnou plastickou deformací došlo na ploše přilehlé k hořáku k mírnému zvětšení tlakových napětí. Naopak v kořenové oblasti došlo k nárůstu tahových sil ve větší míře.

Zkoumání makrostruktury sloužilo k porovnání velikosti TOO a zkoumání tvarových a vnitřních vad. Lze říci, že vhodněji navolené parametry byly u svařování vzorku B4, při kterém vznikla užší tepelně ovlivněná oblast. Jelikož jsou vzorky stejného chemického

složení tak nejsou viditelné rozdíly mezi obsaženými strukturními fázemi a složkami, pouze v jejich rozložení a tvaru.

Tvrдост v základním materiálu po vícenásobné plastické deformaci se zvýšila o 40 HV 0,1. Při svařování vzorku B4 došlo ve vyžíhané oblasti k poklesu hodnot tvrdosti na původní hodnoty. Ve svarovém kovu a oblasti hrubého zrna nedošlo k snížení tvrdosti, která byla získaná procesem vícenásobné plastické deformace. Rozdíl nejvyšších dosažených hodnot mikrotvrdosti byl 60 HV 0,1.

Ze získaných dat lze vyvodit závěr, že svařování materiálu upraveného procesem vícenásobné plastické deformace nevede k výraznému ovlivnění mechanických vlastností tímto procesem získaných. Bylo by však zapotřebí ověřit vliv svařování dalšími experimenty. Mezi navrhované experimenty patří tahová zkouška a únavová zkouška pro přesnější vyvození závěrů. Případně použití jiných metod svařování např. mikroplazmové svařování.

Poděkování

Děkuji mému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Vladislavu Ochodkovi za jeho cenné připomínky a rady při vypracovávání bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat paní Ing. Xenii Ševčíkové, Ph.D. za její pomoc při laboratorním měření.

5 Seznam použité literatury

- [1] KOCICH, Radim. *SPD metody: od mikrometrů k nanometrům*. 1. vyd. Ostrava: Marionetti Press, 2011. 119 s. ISBN 978-80-260-1280-1.
- [2] KUČERA, J. *Teorie svařování*. Ostrava: VŠB-TUO, 1991. 408s. II-220491-3074/91.
- [3] OCHODEK, VI. Residual stress evaluation in spirally welded pipes for gas pipeline. In. 6th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, ICBM 6, 9-10 July 2007, Valenciennes, University of Valenciennes, France, ISBN 951-98400-7-9.
- [4] OCHODEK, VI., RUSZ, S. *Evolution of residual stresses in the steel strip after drece technology*, COMAT 2012, 2nd International Conference on Recent Trends in Structural Materials Nov 21st - 22nd, Plzeň, Czech Republic.
- [5] RUSZ, Stanislav. *Nové nekonvenční technologie* [online]. c2010, [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: <<http://www.novenekonvencnitechologie.cz/?id=2>>.
- [6] *Wikipedista:Technyck/temp02-Wikipedie* [online]. c2011, poslední revize 29.1.2012 [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Wikipedista:Technyck/temp02?uselang=cs>>.
- [7] KOPELIOVICH, Dmitri. *Electron Beam Welding* [online]. c2012, poslední revize 1.6.2012 [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=electron_beam_welding_ebw>.
- [8] *Basic Laser Principals* [online]. c2006, poslední revize 3.12.2012 [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: <<http://www.davincisworld.com/Light/LaserTutorial.htm>>.
- [9] *Laser Welding* [online]. c2010, [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: <<http://www.stellite.co.uk/WeldingProcesses/LaserWelding/tabid/74/Default.aspx>>.
- [10] *LEADING EDGE MECHANICAL - TIG Welding* [online]. c2011, [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: <<http://www.leadingedgemech.com/welding/Tig/tig.html>>.
- [11] *Laser - Wikipedie* [online]. c2011, poslední revize 5.4.2013 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>>.

6 Seznam příloh

Příloha A - Vzorek A2 - Oblast částečné překrystalizace (200x)

Příloha B - Vzorek A2 - Oblast normalizace (200x)

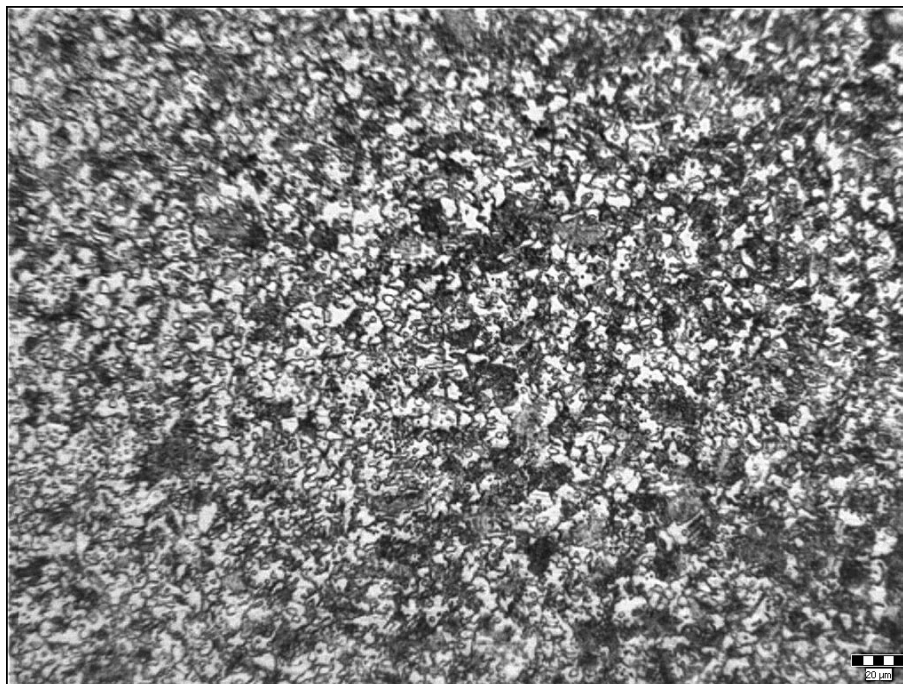
Příloha C - Vzorek A2 - Oblast svarového spoje (200x)

Příloha D - Vzorek B4 – TOO (50x)

Příloha E - Vzorek B4 - Oblast částečné překrystalizace (200x)

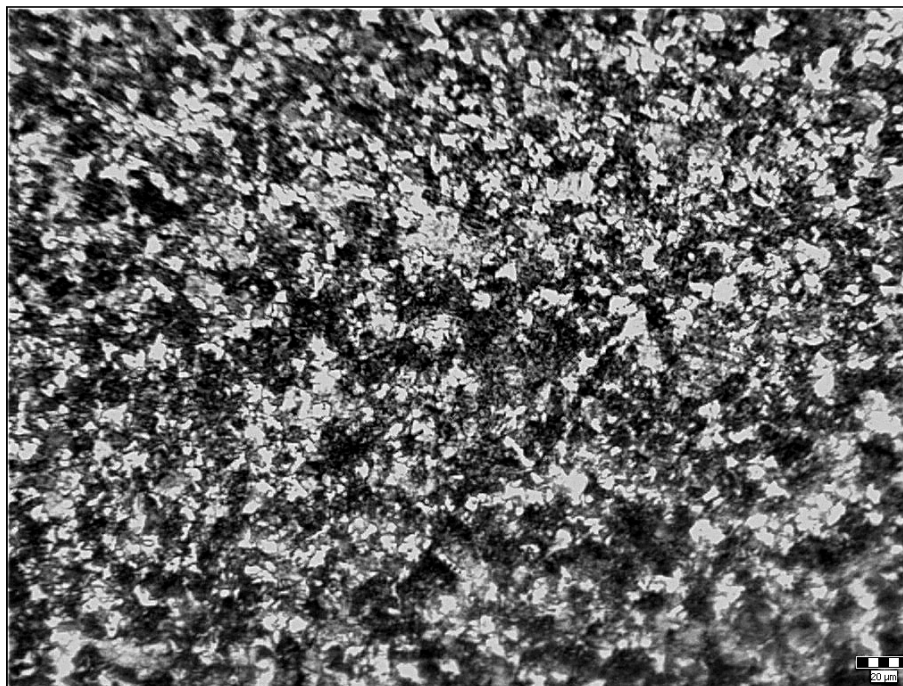
Příloha F - Vzorek B4 - Oblast normalizace (200x)

Příloha A



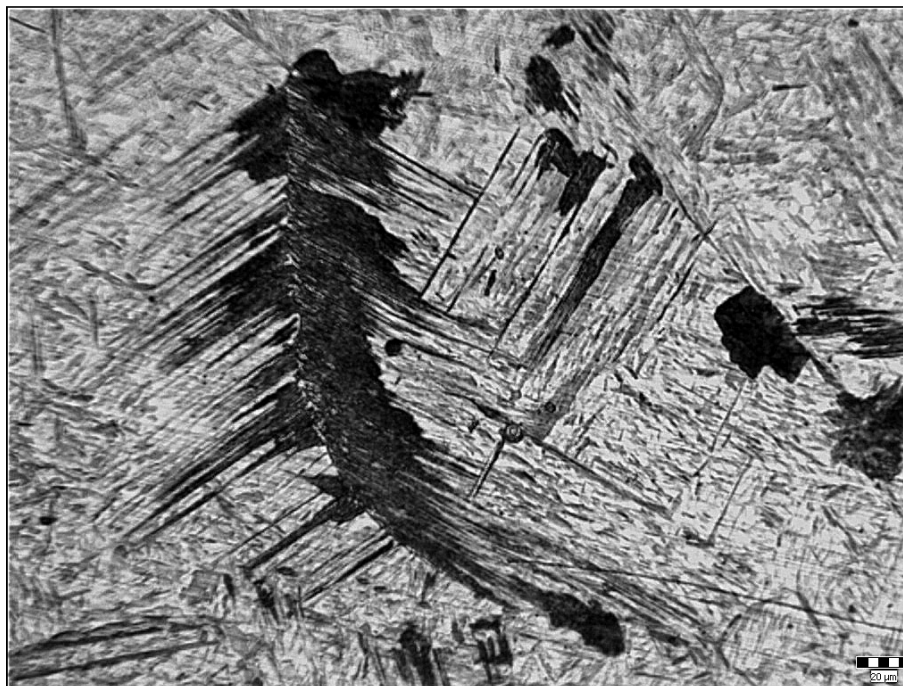
Vzorek A2 – Oblast částečné překrystalizace (200x)

Příloha B



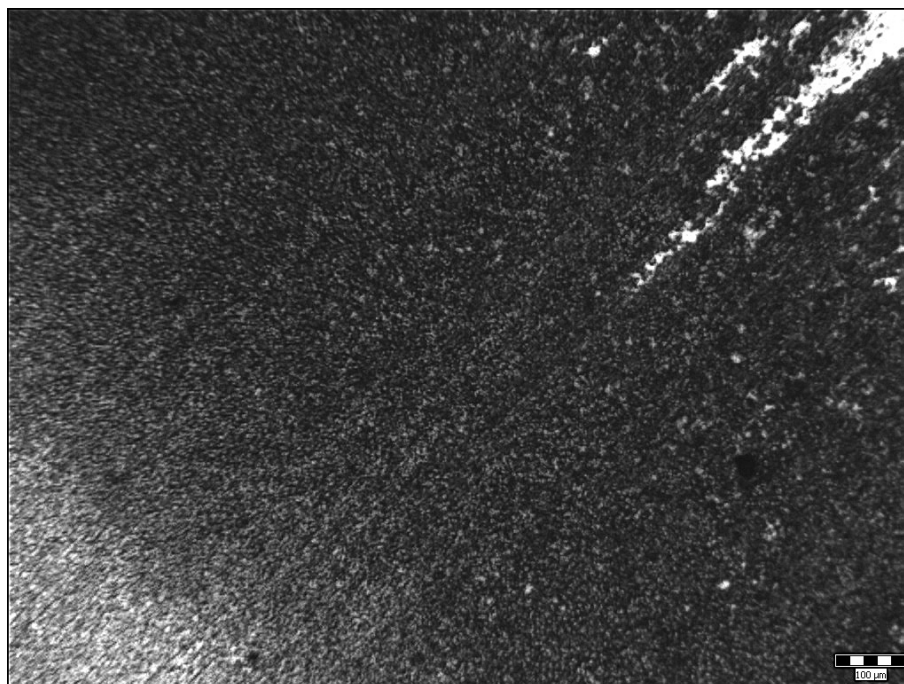
Vzorek A2 - Oblast normalizace (200x)

Příloha C



Vzorek A2 - Oblast svarového spoje (200x)

Příloha D



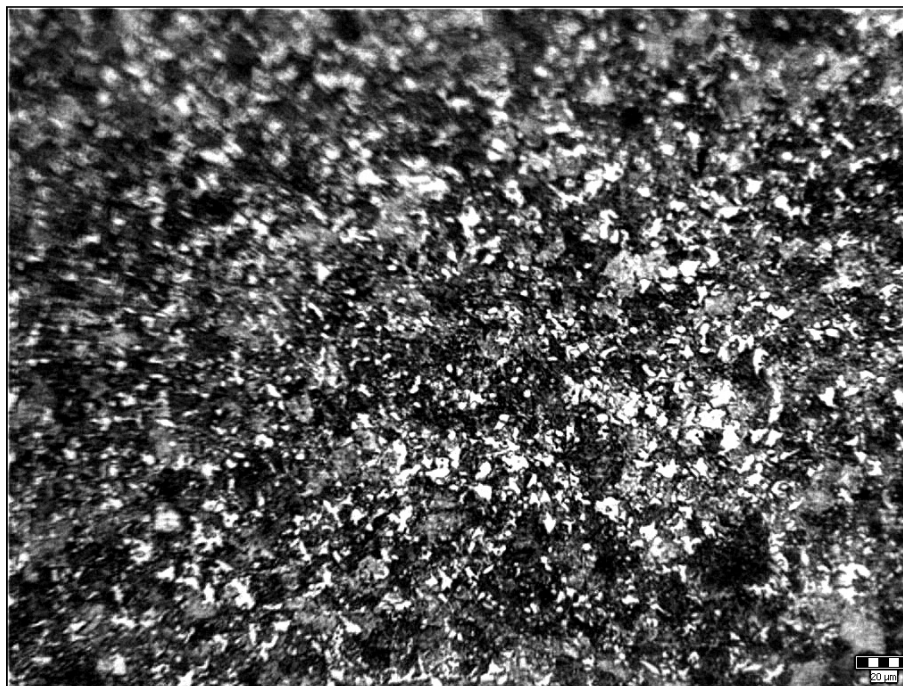
Příloha D – Vzorek B4 – TOO (50x)

Příloha E



Vzorek B4 - Oblast částečné překrystalizace (200x)

Příloha F



Vzorek B4 - Oblast normalizace (200x)